

全国高校素质教育教材研究编审委员会审定
21 世纪全国高校创新型人才培养规划教材
研究生教学用书

岩石矿床地球化学

肖荣阁 刘敬党 费红彩
刘 军 原振雷 王翠芝 等 编著
白凤军 张成学 张汉成

地震出版社

前 言

岩石矿床地球化学是矿床学、岩石学与地球化学的交叉学科，是研究矿床物质富集机理及富集规律的科学。现代地球物质组成研究表明，地球的物质组成首先是化学组成，其以自然金属、主要矿物成分、溶液成分及微量元素状态存在。一些微量元素呈分散状态在矿物岩石中存在，对于这些物质元素的研究只能采取化学分析研究的方法进行，这些元素的聚集共生状态可以指示地质演化和岩石矿床成因，为成矿预测提供依据。

随着现代科技的发展，矿产地质专业也在向数字化、信息化的方向飞速发展，传统的野外及室内定性观察研究已经不能够适应新形势的要求。在矿床成因研究以及找矿预测研究方面都需要进行数字化模拟和定量预测，而数字化的基础是岩石矿床地球化学或成矿地球化学机理及特征的研究。因此岩石矿床地球化学研究在地质研究中具有越来越重要的作用和意义。

本著作以《岩石矿床地球化学》为书名，基于三个原因考虑：

第一，矿体是自然存在的地质体，矿石是一种特殊的岩石，在矿床学研究中涉及到大部分岩石地球化学的内容。

第二，矿体都产于围岩岩石中，一些围岩是成矿源岩，一些是容矿岩石，不同的矿化围岩形成不同的矿床，矿床学研究必然涉及到与围岩关系的研究，因此必须进行岩石学研究。

第三，我们提出新的矿床成因概念，即成岩矿产和非成岩矿产，成岩矿产是指品位高，构成岩石主要成分的矿产；非成岩矿产是指品位低，不构成岩石主要成分的矿产。前者已经是岩石学研究的范畴，对于某些非金属矿产，更是涉及到岩石学所研究的内容。而在现代经济发展中，各种岩石都在不断作为有用矿产被开发利用，因此我们认为矿床学研究必须与岩石学结合起来。

本著作力求理论通俗化，突出实用性与方法性，以便于学习者可以自学并广泛参考应用。在自然界没有绝对相同的两种地质作用，也没有绝对相同的两个地质体或者矿床，在岩石矿床地球化学研究中，也只能够进行相对的比较分析，而不可能做到绝对一致，因此在矿床学研究中需要广泛掌握典型岩石矿床地质地球化学资料，进行广泛比较，达到逐步趋近于客观的结论认识，从而指导地质勘探。本教材提供了一系列典型岩石类型、矿床类型的研究成果，作为比较研究的基础。

本教材基本内容由三部分 12 章 49 节组成，第一部分包括岩石矿床地球化学概论和成矿地球化学总论；第二部分是各种地质作用中成岩成矿作用中的地球化学特征、地球化学分析方法，及典型矿床地球化学特征，如沉积成岩成矿地球化学、火山岩浆成岩成矿地球化学、变质成岩成矿地球化学、有机成岩成矿地球化学、流体成岩成矿地球化学；第三部分包括不同成矿物质来源的地球化学特征、元素组合规律及其判别方法、成矿物理化学条件以及成矿动力学。

岩石矿床地球化学绪论和总论部分，介绍了现代矿床地球化学的研究方法、一些重要

成矿控制因素、近 20 年来世界上一些重要矿产地质研究成果以及岩石矿床地球化学的发展方向。

在各种地质作用地球化学章节中重点介绍地质作用类型的产物及地球化学标志, 尤其突出现代成矿理论——热水成矿流体及热水沉积地球化学的研究方法、判别标志。

在成矿物质来源与成矿动力学章节重点介绍成矿物质来源的判别方法和成矿动力学的研究方法。

本著作重点是研究各种成岩成矿地球化学特征及不同岩石矿床中的地球化学规律及其研究方法, 对于纯理论的探讨将给出主要的参考文献。通过本课程学习, 使学生掌握岩石矿床地球化学的一般研究方法, 为深入的理论探讨打下基础。

本著作的特色是对近 20 年来国内外成岩成矿地球化学研究的理论成果进行总结, 根据近 10 几年来项目组的科研教学经验成果, 突出方法性和实用性, 系统阐述各种成矿作用地球化学, 有利于不同地质矿业专业部门的研究生广泛参考学习, 具有广泛普及性的特点。

目前在地质学和地球化学一级学科中都设有矿床地球化学或成矿地球化学分支学科, 并且在矿床地质和地球化学研究及教学中广泛应用, 但是所用资料都是零散研究资料的归纳, 尚没有一部系统可用的参考讲义。随着地质及地球化学教学研究工作的深入, 这种局面已不能够适应新的科技形势发展, 急需一套完整系统的研究生教材, 使岩石矿床地球化学教学及科研系统化, 以提高教学效果。

通过近 10 几年来本课程的教学科研发现, 系统学习岩石矿床地球化学理论方法, 可以明显提高教学研究效果, 本著作也可以作为科研论文研究的重要参考资料。通过本课程的学习, 学生可以系统掌握矿物学、岩石学、矿床学及地球化学的研究方法和研究动向, 提高科研水平, 因此本著作具有广泛的实用性。

本著作是肖荣阁教授为首的研究组近 10 几年来承担的教学科研成果的总结, 融会了研究生专业课程讲义及一系列的科研报告、学位论文与科研论文成果。刘敬党、费红彩、刘军、原振雷、王翠芝、白凤军、张成学、张汉成、张宗恒、师永民、安国英、刘国印、葛文胜、王斌、吴振、侯万荣、王美娟、戚开静、范军、隋德才、杨立朋、周红春、冯佳睿、赵艳芳、许燕等在博士及硕士论文研究期间参加了相关的课题研究, 为本著作积累了丰富的资料, 并参加了相关章节的编写工作。

本著作编写期间得到了国家自然科学基金委员会、国家地质调查局、国土资源部科技国际合作司、国家地质调查局发展中心、辽宁省国土资源厅、河南省国土资源厅、内蒙古地调院、辽宁化工地质勘查院、青海有色地质勘查局及有关矿业公司的项目及经费支持, 由“全国高校素质教育教材研究编审委员会”专家评审和中国地质大学(北京)研究生院专家评审, 列入“21 世纪高校创新型人才培养系列规划教材”和矿物学、岩石学、矿床学专业研究生必修课程教材, 并给予出版经费支持!

本著作编写过程及科研教学工作中得到翟裕生院士及蔡克勤教授、崔彬教授等人的关怀指导, 翟裕生院士百忙中, 审阅书稿, 并为之作序, 在此深表感谢!

作 者

2007 年 9 月于北京

目 录

第一章 绪论	1
第一节 研究意义、内容和研究方法.....	1
第二节 矿产的基本特征.....	5
第三节 矿石的品位及矿产储量规模.....	8
第四节 岩石矿床地球化学的发展历史与方向	11
第二章 成矿地球化学总论	18
第一节 地球结构与矿化关系	18
第二节 成矿地球化学	20
第三节 成矿物理化学及边界条件	26
第四节 大地构造的控矿作用	30
第三章 岩浆矿床地球化学	33
第一节 岩浆岩时空分布	33
第二节 岩浆岩化学成分	38
第三节 岩浆岩的微量元素	45
第四节 典型岩浆矿床——白云鄂博 Nb - REE - 铁矿床	53
第四章 沉积成矿作用环境	77
第一节 沉积成矿作用概述	77
第二节 河流沉积作用	85
第三节 湖泊沉积	94
第四节 风力沉积.....	104
第五节 冰川沉积.....	109
第六节 海洋环境与海洋沉积.....	111
第五章 沉积岩矿床地球化学	126
第一节 沉积岩类型.....	126
第二节 沉积岩岩石地球化学.....	134
第三节 典型沉积岩矿床——密西西比河谷型 (MVT) 铅锌矿床	145
第六章 有机成矿作用地球化学	171
第一节 有机质组成.....	171
第二节 有机成矿地球化学.....	181
第三节 云南中生代砂岩铜矿有机地球化学研究.....	185
第四节 黏土矿物与有机质演化关系.....	189

第七章 区域变质矿床地球化学	194
第一节 区域变质岩石学.....	194
第二节 变质岩岩石地球化学.....	202
第三节 微量元素地球化学.....	207
第四节 典型变质矿床——辽东地区古元古界变质热液交代型硼矿.....	213
第八章 风化矿床地球化学	231
第一节 风化作用特征.....	231
第二节 风化富集作用.....	235
第三节 风化改造及次生富集作用.....	241
第九章 成矿流体地球化学	249
第一节 成矿流体来源.....	249
第二节 成矿流体成分及化学性质.....	254
第三节 成矿流体形成与演化.....	258
第四节 成矿流体中同位素演化.....	261
第五节 流体运移与成矿物质迁移方式.....	268
第六节 成矿流体类型.....	272
第七节 成矿流体物理化学及研究方法.....	280
第十章 热水沉积及交代作用地球化学	295
第一节 热水流体结晶沉淀作用.....	295
第二节 热水沉积岩.....	297
第三节 热液交代作用及围岩蚀变.....	307
第四节 热水沉积岩及交代岩石的同位素组成.....	320
第五节 典型喷流沉积矿床——火山岩型块状硫化物 (VMS) 矿床.....	335
第十一章 成矿物质来源及其研究方法	357
第一节 成矿物质来源与含矿建造.....	357
第二节 判别成矿物质来源的地质学方法.....	369
第三节 判别成矿物质来源的地球化学方法.....	371
第四节 同位素示踪分析.....	375
第十二章 成矿动力学	384
第一节 动力学演化曲线.....	385
第二节 确定变质温度压力.....	389
第三节 成矿流体的温度压力演化.....	394
结 语	401
主要参考文献	402

第一章 绪 论

岩石矿床地球化学是岩石学、矿床学与地球化学的交叉学科，引入地球化学的理论方法研究矿床学，作为矿床学的研究基础，因此可以说岩石矿床地球化学是研究成矿作用过程中成矿物质、成矿流体形成与演化，元素分配、组合，成矿物质迁移、定位、分布特征及其地球化学、物理化学过程的科学。

岩石矿床地球化学的发展依赖于矿床学、岩石学理论实践的发展，更离不开各种测试分析技术的进步及实验技术的发展。

第一节 研究意义、内容和研究方法

一、研究意义

1. 有助于成矿理论研究

成矿作用是自然界发生的特殊化学反应过程，为了深入探讨现代成矿理论，必须研究岩石矿石化学组成及自然化学反应过程，因此随着现代分析测试技术的发展，现代矿床学研究已经不限于野外地质描述，而需要探讨自然物质演化的全过程及其物理化学条件。

2. 指导找矿实践

岩石矿床地球化学研究可以直接指导找矿实践，尤其是成矿元素组合研究在指导找矿方面起到了重要作用，例如低温地球化学元素组合研究，直接指导了20世纪80年代在滇黔桂地区、陕甘川地区的卡林型金矿找矿工作。其关键方法是运用了在低温条件下金可以与汞、砷、锑等元素密切共生的机理，在已知砷、锑、汞矿田、矿带中进行金矿普查工作。同样在这些矿区找到了铀元素富集体。因此矿床地球化学除了作为找矿理论指导找矿外，一些地球化学异常也是直接的找矿依据。

3. 有助于定量化研究

在现代矿床学研究中，对一个地区进行成矿远景分析评价，除了考虑地质背景、构造、古地理、岩浆活动、地层等因素外，对矿化蚀变、元素共生组合等矿床地球化学的研究也是重要的方面。尤其是数字化技术的发展，使矿床学研究趋于定量研究，矿床地球化学就显得更为重要。

4. 有助于认识成矿作用中特殊的地球化学机理

长期以来，人们一直认为成矿作用是一种特殊的成岩作用，根据三大成岩作用划分为三大成矿作用，或三大矿床类型，即岩浆矿床、沉积矿床和变质矿床。岩石矿床地球化学

研究发现,成矿作用与成岩作用并不是完全等同的,成岩作用只涉及地球或自然界的常量元素,或者丰度较高的元素,而成矿作用既涉及常量元素,又涉及微量甚至超微量元素的富集作用。

常量元素只要富集几倍或者几十倍就可以成矿,而微量元素则要富集几个数量级才能够形成可以利用的矿床级别。因此有很多成矿作用,尤其是微量、超微量元素富集成矿作用对成岩是无意义或是不能形成岩石的地质作用的,有许多矿床是在比成岩作用更复杂的复合多期地质作用下叠加形成的。在适当地质和物理化学条件下,岩石中分散状态的微量元素如 Au、U、Cu 等可以被大气降水或海水下渗形成的热液所溶解并被搬运富集在适当的部位形成矿床,而这种地质作用与成岩作用不同,称为改造作用。石油、天然、气煤等有机矿床也是改造作用形成,也不同于一般的变质矿床。在改造成因矿床学研究中,矿床地球化学具有更重要的意义。

以此来研究划分矿产类型,我们可以划分出高丰度成岩矿产,如铁、铝、锰、蒸发盐、硅岩、煤及非金属岩石矿产等,其品位在 10% 以上,构成造岩矿物可达 20%~30% 以上;低丰度非成岩矿产,如金、银、金刚石、稀有、稀土、铜、钼、钨、锡等元素矿产和矿物矿产,其品位在 5% 以下,不构成主要造岩矿物或成岩元素。

对于成岩矿产我们可以用岩石学的研究方法进行研究,对于非成岩矿产需要用一些特殊的方法,如地球化学或者只能根据分析化学方法进行研究。

二、研究内容

传统矿床学研究强调的岩浆、沉积及变质作用的研究,但是现代成矿作用研究发现,成矿作用远不止三大地质作用,其与地球上特殊的环境,即水、大气及生物也有密切关系,并且一些矿床是多种地质作用叠加形成的,因此岩石矿床地球化学包括如下主要研究内容:

1. 成矿物质来源研究

成矿物质来源是研究矿床成因及区域找矿预测的基础,涉及到矿化围岩、矿床的岩石学及岩石地球化学各个方面。

2. 生物及有机作用研究

生物及有机质是地球表层特殊的物质形式,自从元古代地球上有生物以来,生物作用及有机质就参与到成矿地质作用中,因此研究元古代以来的浅成及表生矿床成因时,必须考虑生物及有机作用。

3. 成矿流体及成矿物理化学条件研究

大部分矿床成矿作用都与流体有关,因此成矿流体地球化学研究始终是矿床地球化学研究的重要方面,根据成矿流体地球化学分析成矿温度、压力、pH、Eh 等的变化,对于矿产种类及矿化分带研究有重要意义。

4. 成矿元素地球化学性质及其赋存状态

这是探讨成矿元素地球化学行为的基础,对于成矿理论研究有重要意义,同时也有助于矿石加工、选冶工艺设计(黄礼煌,1995;贺炳璋,1984;郭炳闻,1990)。

5. 元素共生组合研究

这是研究成矿物质来源及成矿预测的基础，同时是研究成矿物质运移的理论基础，并有助于指导成矿预测。

6. 矿床矿化及蚀变分带研究

成矿元素的垂直分带研究是进行矿床深部预测和勘探的重要方面，例如陆相火山岩中产出的明矾石-高岭石型金矿床中可以见到上部金矿下部铜矿的垂直分带现象，在台湾金瓜石和福建紫金山金矿床中，这种分带十分明显。另一些较富银的陆相火山岩型金矿床中显示自上而下为金-银-铅锌的垂直分带现象。

三、研究方法

20世纪以来科学技术和社会经济得到了突飞猛进的发展，人们的生活条件也得到了极大改善。但是所有这些进步与18~19世纪的基础科学发展分不开，18和19世纪物理学、化学的一些基础理论，如光学、动力学、机械学、电子学、元素化学等基础理论为20世纪的发展奠定了基础。

现代科学技术的进步极大拓宽人们的视域，可见光从远红外到紫外光及X光，远远超出了可见光的范围。对物体的观察从宏观宇宙到微观的电子、离子，远远超出了可视范围。矿床学的发展也与其他学科技术的进步分不开。

矿床是过去漫长地质时期形成的地质体，任何人都无法追溯观察矿床形成的全过程，我们只能根据现代的一些地质现象、地质作用过程，如沉积、火山、地震、地热、风蚀及有限的模拟实验进行研究。

在古代，人们主要依赖于肉眼的直接观察在野外进行研究，早期人们总结出“上有蓝绿下有赤铜，上有锈黄下有磁石”的经验，这是根据氧化物、风化壳找矿的经验。随着探矿与测试技术的进步，研究矿床的手段也越来越多。

常用的方法是野外观察一般的地质现象、矿石的结构构造、矿床构造、地层岩石等等；自光学显微镜应用于矿床学研究之后，矿床学得到了突飞猛进的发展。现在用于矿床学研究的光学显微镜有研究透明矿物的透射偏光显微镜和研究不透明矿物的反射偏光显微镜，也叫矿相显微镜；研究矿物更进步的仪器有X光、透射电子显微镜、扫描电子显微镜、隧道显微镜等；各种化学分析仪器用于研究常量元素和微量元素，如ICP质量分析仪器、电子探针、阴极发光、中子活化分析、离子探针；研究成矿流体的方法有包裹体冷热台测试、包裹体同位素质谱、激光拉曼光谱、红外光谱；研究成矿年龄、成矿物质来源用放射性同位素、稳定同位素等方法。还有古地磁方法、成矿实验、电法、磁法、地震、重力、遥感物理方法。几乎每一技术进步、每一种测试方法的出现都可以用于矿床学研究中。

矿床学研究中连锁发现及偶然发现的例证也是很多的，如斑岩铜钼矿床、卡林型金矿、热水沉积矿床等都是连锁发现。有一些矿床纯属偶然发现，如金堆城钼矿。

矿床学具体的研究方法主要包括五个方面：收集资料，野外调查，实验分析，如同位素地球化学、有机地球化学、构造地球化学等研究方法，模拟实验及实验地球化学研究和总结综合。

1. 收集资料

区域地质资料、区域报告、区域矿产图及报告等属于公用资料，可以在相关部门借阅；矿产研究报告、矿区矿床研究报告等属于保密性及商业性较强的资料，需要办理相关保密手续；相关科研论文可以在相关学术期刊采用检索的方法查阅，采用现代计算机网络技术，在网上图书馆查阅将更为方便快捷。

2. 野外调查

包括测剖面，详细观察、记录、编图和坑道调查，典型现象观察和精测平面地质图。观察内容包括矿物组成、岩石类型、矿石结构构造、矿化特征、区域构造等，并采集系统标本进行室内测试（高炳璋，1991；房立民，1991）。

3. 实验室研究

实验室研究可以分为如下几个方面：

①矿相学光薄片鉴定分析；②成分分析，包括主元素、微量元素、稀土元素光谱分析、探针分析、化学分析等（刘英俊，1987；J. 霍夫斯，1976；张承亮，1991；王中刚，1989）；③矿物形貌鉴定，手段有扫描电子显微镜、双目镜等（赵杏媛，1990）；④成矿流体分析，方法有冷热台均一法、爆裂法测温，气相色谱，拉曼探针等（卢焕章，1990；肖荣阁，2001）；⑤稳定同位素分析，包括 $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ ， $^1\text{H}/^2\text{H}$ ， $^{16}\text{O}/^{18}\text{O}$ ， $^{34}\text{S}/^{32}\text{S}$ ， $^{87}\text{Sr}/^{88}\text{Sr}$ ， $^{10}\text{B}/^{11}\text{B}$ ， $^{208}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ ， $^{35}\text{Cl}/^{36}\text{Cl}$ ， $^{143}\text{Nb}/^{144}\text{Nb}$ 。稳定同位素的分馏系数受地质作用影响，因此是指导成矿物质来源的有利示踪剂；⑥放射性同位素， $^{40}\text{K}/^{39}\text{K}$ ， $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ， $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$ ， ^{232}Th ， $^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os}$ ；⑦晶体结构分析等。

4. 成矿实验

针对不同的成矿作用及矿床类型采取设计不同的实验方案：

- (1) 对岩浆矿床一般采用高温高压实验，分为恒温与恒压实验；
- (2) 对热液矿床采用溶解淋滤实验（曾贻善，1987，1993；Brischoff J. L.，1981）；
- (3) 对蒸发沉积矿床学采用等温蒸发实验等。

5. 遥感信息解译与计算机信息处理

现代科学技术的应用明显促进了矿床地球化学的发展和进步，由于矿床地球化学的许多研究内容要结合地质体进行，并且有大量的信息资料数据需要处理，现代化技术的应用明显提高了劳动效率及分析质量。

6. 建立成矿地球化学模型

在各种信息资料分析研究的基础上，建立矿床成矿模型，指导区域找矿预测是矿床地球化学研究的最终目标。对现有研究分析资料进行综合研究称为归纳整理，利用可比成矿模式进行比较研究称为演绎推理。自然界没有两个完全相同的矿床进行比较，任何一类矿床既有共性的一面，也有明显的差异，因此归纳总结与演绎推理都是重要的。

直到现在，对于矿床模型的建立有各种不同的标准：

- (1) 以成矿地质作用为标准，如岩浆矿床、沉积矿床、变质矿床、岩浆热液矿床、风化残积矿床、喷流沉积矿床、蒸发沉积矿床等；
- (2) 以成矿物理化学条件为标准，如高温热液矿床、浅成低温热液矿床等；

(3) 以含矿岩石为标准, 包括砂岩型铜矿、绿岩型金矿、蚀变岩型金矿、斑岩型矿床、细碧角斑岩型矿床、矽卡岩型矿床、石英脉型金矿等;

(4) 以矿石矿物组成为标准, 如铜镍硫化物矿床、黑矿型矿床、黄矿型矿床、钒钛磁铁矿型矿床;

(5) 以典型矿床产地为标准, 如密西西比型铅锌矿床、卡林型金矿、穆龙套型金矿、鞍山式铁矿、宣龙式铁矿等;

(6) 以成矿及矿石构造为标准, 如韧性剪切带型金矿、微细浸染型矿床、热液脉状矿床;

(7) 以开发工艺为标准, 如地浸型铀矿;

(8) 综合标准, 如火山岩型块状硫化物矿床, 是以含矿岩石与矿石矿物综合为标准; 爆破角砾岩型矿床, 是地质作用与含矿岩石的综合为标准; 块状硫化物矿床是以构造和矿石矿物的综合为标准。

以上矿床模型都是经过矿床学家多年研究总结的结果, 简单、实用, 并且普遍被人们接受, 具有很大的可比性, 有利于实际工作中进行参照对比。对于一个具体研究区域或者矿床建立其成矿模型是必要的, 它对于区域成矿预测具有实际指导意义, 但是自然界没有完全相同的两个矿床, 任何一个已知的矿床模型只能是一个参照, 而必须考虑其特殊性。

随着探矿技术及矿床学理论研究的进步, 会不断发现新类型的矿床, 这需要进行全面的工作, 从基础成矿背景条件、成矿物理化学、地球化学演化、成矿地质作用、矿床矿化蚀变特征、矿体产状、矿物组合及其空间变化等各个方面进行全面总结, 甚至于实验模拟, 最后才能总结出一个全面的矿床模型。

第二节 矿产的基本特征

矿产是自然界产出的有用矿物岩石资源, 具有利用价值和商业价值。

矿产是社会经济发展的基础, 矿产资源的利用和开发在社会发展中起重要作用, 它可以促进社会经济发展, 反之社会的发展程度也以利用和开发矿产的水平为标志。

人们利用矿产是与历史经济发展有关的, 在现代, 大部分矿物、岩石都能被利用, 因此矿产这个术语几乎包括了自然界产出的一切矿物、岩石, 而在古代历史上人类利用矿产的能力是极其有限的。

早期的人类社会主要是以利用自然矿物产品来划分历史阶段的, 如石器时代、青铜器时代、铁器时代等。近代人类利用矿产品的技术已不是单一利用某种矿产, 而是综合利用各种矿产, 并能够提炼纯化或有意识制造一些合金加以利用。

人类社会包括人们的日常生活一天也离不开矿产, 而且矿产的重要性正在变得日益突出。近 50 年来, 矿产开发利用量急剧增长, 超过过去人类利用量的总和。现代开采利用矿产的规模、利用率是衡量一个国家财富、科技和经济发展水平的重要尺度。

某一矿产地能否构成矿床加以开采, 主要与技术条件有关。能否开采利用是技术问题, 开采是否划算是经济问题, 因此矿床学也叫经济地质学。

国民经济建设和发展离不开矿产资源, 一个国家矿产资源的多少是衡量这个国家经济

基础和经济实力的重要标志。

一、矿产的基本特征

矿产具有如下基本特征：

1. 矿产是不可再生资源

不可再生是指不可能在短期内重新生长的，因此矿产资源的大量消耗导致矿产资源危机一天天加重。如何解决矿产资源危机，做到经济持续发展，是当代科学技术的重要研究内容之一。解决矿产资源危机可以进行如下方面的工作：

(1) 合理开发利用现有矿产资源，增加矿产资源的可利用率；

(2) 提高开采、选矿及冶炼技术，降低生产成本，从而降低矿石品位，增加矿产可利用量；

(3) 综合开发利用共生伴生矿产；

(4) 采用新技术，寻找新的矿产地；

(5) 改善边远地区基础条件，扩大可开采矿产地；

(6) 开展新材料技术研究，寻找可替代矿产品。

2. 矿产区域分布不均匀性

在不同地区、不同国家矿产种类、矿产储量分布是极不均匀的。有一些国家或地区某些矿产极其丰富，另一些矿产极其匮乏，如南非盛产金刚石、黄金，加拿大生产钾盐，中东富产石油。这就导致矿产具有可交易价值。因此合理开发利用矿产，提高矿产品价值就成为矿产工作的重要任务（翟裕生，1999）。

3. 矿产的共生性

自然产出的有用矿物岩石资源都是矿产。从这个意义上说，可以利用的矿产都是共生或伴生在一起的，可以具体划分为：金属矿产之间的共生、金属与非金属之间的共生、金属与有机矿产之间的共生、非金属与有机矿产之间的共生等（孙传光，2000；和汉辉，1988；高建华，1994）。

4. 不同矿产品位具有极大差异

贱金属品位是以百分比含量计，贵金属品位是以 g/t 或者克拉计，品位差在千倍以上。因此对于不同矿产就需要采取不同的评价开发方法，物理学或者化学方法是矿产开发的主要方法。

5. 具有不同的物理化学特征

矿物、岩石矿产的化学性质：溶解性、氧化还原性、化学亲和性；矿物、岩石矿产的物理性质：磁性、导电性、导热性、孔隙度、比重、脆塑性、延展性等；岩石、矿物的可加工性等（甘理明，1992；地质矿产部物资局，1991；赵东甫，1986；郑延力，1992；张明朴，1994；中国科学院化工冶金研究所，1991）。

二、我国矿产的基本特征

矿产工业也是我国国民经济的基础产业，如冶金、化工、建筑、农业、电力、轻工、核工业都要直接利用矿产资源。更重要的是矿产开发可以提高相关行业数十倍或上百倍的

增值效应,如1995年我国矿产开发总产值3386.39亿元,而以矿产品为原料的轻工业和重工业产值为39077.56亿元,增值11.5倍。

我国是一矿业大国,矿产资源种类齐全,有一些矿种极其丰富,也有一些是短缺品种。我国的矿产资源特征与我国的大陆地壳结构有密切关系,我国的大陆地壳以花岗岩重熔地壳发育为基本特征,同时中生代地壳活动较强,因此导致了稀有、稀散、稀土及与花岗岩、碱性岩有关的壳源岩型矿产形成广泛,而与基性、超基性幔源岩型有关矿产相对贫乏(袁见齐等,1985)。我国矿产资源有四个基本特征:

1. 矿种齐全,非金属及一些稀有金属矿产具有优势

我国目前已经探明的153种矿产中,有20多种居于世界前列,有近10种可排世界第一,如稀土、钒、钛、钽、钨、铋、锂等金属;芒硝、石膏、重晶石、菱镁矿、膨润土、石墨、煤等非金属储量都居世界第一位,锡、镍、钼等25种矿产储量居世界前三位。

按1990年统计,我国稀土储量占世界储量80%,铋52%,钨47%,煤46%,菱镁矿30%,重晶石24%,钒14%,萤石12%。按45种主要矿产的可比价值,我国约为世界矿产总价值的10%,居世界第三位。但人均占有量仅占世界人均占有量的27%,居80位之后。

根据已探明的矿产储量,我国的矿产资源可以分为3类:

(1) 具有绝对优势的矿产,其储量占世界一、二位,人均占有量大于世界平均占有量:稀土、钛、钽、钨、锡、钼、铋、钒、锂、石膏、膨润土、芒硝、重晶石、菱镁矿、石墨等。

(2) 具有相对优势的矿产,其储量在世界前三位,人均占有量接近世界平均占有量:煤、铌、铍、汞、硫、萤石、滑石、磷、石棉等。

(3) 具有潜在优势的矿产,其储量居世界前列,但人均占有量偏低,并经过进一步勘探有可能提高储量的矿产:锌、铝土矿、珍珠岩、高岭土、耐火黏土等。

2. 贫矿多,富矿少

我国大宗矿产的品位普遍偏低,从已探明的矿产看,85%的铁,70%的铜、磷、铝土矿及50%的锰属于贫矿。此外,铬铁矿、钛矿、铅矿、钨矿、砷矿、硫铁矿、银矿、铂族矿、铍矿、钼矿、锆石、硼矿等品位也低于国外同类矿产品位。

3. 中小型矿、伴生共生矿产多

我国有一些可称世界第一的大型矿床,如内蒙古白云鄂博稀土矿、湖南柿竹园钨锡矿、广西大厂锡矿、湖南锡铁山铋矿、辽宁海城菱镁矿、范家堡滑石矿、内蒙古达拉特芒硝矿、贵州天柱重晶石矿等,但是大多数矿床属于中小型矿床。

我国大部分矿床属于多组分共生或伴生矿床,如攀枝花铁钒钛铬共生,白云鄂博铁、稀有、稀土共生,金川镍铜钴铂共生,柿竹园钨锡铋铅锌共生,这些共生矿的综合利用可以明显提高经济效益,但是现在这些矿产综合利用程度还相当低。

4. 矿产地理分布极其不均

大部分矿产具有区域性集中分布的特点,如50%的铁集中在鞍本、冀东、攀西地区;64%的煤集中在山西、内蒙古和陕西;90%的铝集中于山西、贵州、河南、广西;77%的磷集中于云南、贵州、四川、湖南、湖北。这种分布的不均匀性对我国的工业布局 and 经济发展带来不利影响,在相当长时间内将维持北煤南运、南磷北送、西矿东流的局面。

第三节 矿石的品位及矿产储量规模

矿石的品位是指矿石中 useful 组分（矿物、元素或者化合物）的含量，可以用元素%，矿物%，化合物%，g/t, mg/t, g/m³等多种单位表示。

普通金属矿床矿石品位用金属元素百分比（%）含量表示，如铁、铜、铅、锌等等。大多数非金属矿床矿石是以化合物或有用矿物的百分比含量表示，如 KCl、NaCl、石膏、黏土矿床等。

贵金属如黄金以 oz/t, g/t 表示，金刚石以 ct/t 表示，砂矿以 oz/m³, g/m³ 等表示。

一、决定矿床工业价值及品位的主要因素

(1) 矿床的特性、形态、产状、储量规模、矿石质量（品位、有益或有害组分）、矿石的综合利用价值、采矿与选矿条件等；非金属矿床的物理化学性质及加工工艺条件。

无论是边界品位还是工业品位，它的确定都是从经济利益来考虑。

一是取决于矿床规模的大小，矿床规模越大品位要求越低。

二是矿石中伴生的有益元素含量较高并可以综合利用时，则主要矿物元素品位可以适当降低，如铜矿石中的 Au、Ag 等。

三是矿石矿物种类，含同种元素的矿物种类是不同的，其选矿条件也不同，对于易选矿石或者说选矿成本较低的矿石品位就可以降低。相反则提高品位，如硫化物与氧化物，钛铁矿（TiO₂ 8%）、金红石（TiO₂ 4%）、菱铁矿、磁铁矿、岩金和砂金等。

(2) 国民经济要求，本国经济发展对矿产的需求情况，国际市场供需形势及国际市场价格等。

(3) 矿区经济、地理、交通运输、能源或水利等条件。

二、矿产储量

矿产储量是指矿产的总资源量，矿产储量一般分为表内储量与表外储量两类（袁见齐等，1985）。

表内储量是指当前可以开采利用的储量，表外储量是指当前不能开采利用的储量，是由多种因素造成的，或者是有害物质过高、矿体不稳定不利于开采、地质条件复杂、加工工艺未解决，或者受地理条件、交通条件、能源供应等社会因素限制。

从经济效益考虑，矿产储量还可分地质产量与工业储量。地质储量是指已探明的全部资源量，包括表内储量与表外储量。工业储量指只是部分可以回收利用的储量，只是表内储量的一部分。按不同的矿种采掘回收率计算，工业储量只占地质储量的30%~50%。

1999年10月国土资源部储量司颁布了《固体矿产资源/储量分类》国家标准，对以前勘查储量进行套改。《固体矿产资源/储量分类》标准采用三维定义法，分别考虑了矿产的经济意义、可行性评价阶段及地质可靠程度（表1-3-1，表1-3-2）。

表 1-3-1 《固体矿产资源/储量分类》国家标准表

	查明矿产资源及编码			潜在矿产资源
	探明的	控制的	推断的	预测的
经济的	可采储量 (111)			
	基础储量 (111b)			
	预可采储量 (121)	预可采储量 (122)		
	基础储量 (121b)	基础储量 (122b)		
边际经济的	基础储量 (2M11)			
	基础储量 (2M21)	基础储量 (2M22)		
次边际经济的	资源量 (2S11)			
	资源量 (2S21)	资源量 (2S22)		
内蕴经济的	资源量 (331)	资源量 (332)	资源量 (333)	资源量 (334)

* 根据国家技术监督局 GB/T 17766 - 1999。

表 1-3-2 固体矿产资源储量分类与编码定义说明表

类	类 型	编 码	定 义
储 量	可采储量	111	探明的经可行性研究的经济的基础储量的可采部分
	预可采储量	121	探明的经预可行性研究的经济的基础储量的可采部分
	预可采储量	122	控制的经预可行性研究的经济的基础储量的可采部分
基 础 储 量	探明的 (可研) 经济基础储量	111b	探明的经可行性研究的经济的基础储量
	探明的 (预计、可研) 经济基础储量	121b	探明的经预可行性研究的经济的基础储量
	控制的经济基础储量	122b	控制的经预可行性研究的经济的基础储量的可采部分
	探明的 (可研) 边际经济基础储量	2M11	探明的经可行性研究的边际经济的基础储量
	探明的 (预可研) 边际基础储量	2M21	探明的经预可行性研究的边际经济的基础储量
	控制的边际基础储量	2M22	控制的经预可行性研究的次边际经济的基础储量
资 源 量	探明的 (可研) 次边际经济资源量	2S11	探明的经可行性研究的次边际经济的基础储量
	探明的 (预可研) 次边际经济资源量	2S21	探明的经预可行性研究的次边际经济的基础储量
	控制的次边际经济资源量	2S22	控制的经预可行性研究的次边际经济的基础储量
	探明的内蕴经济资源量	331	探明的经概略 (可行性) 研究的内蕴经济的基础储量
	控制的内蕴经济资源量	332	控制的经概略 (可行性) 研究的内蕴经济的基础储量
	推断的内蕴经济资源量	333	推断的经概略 (可行性) 研究的内蕴经济的基础储量
	预测的资源量	334	潜在矿产资源量

根据新的国家标准, 1999 年以后对原有矿山勘探储量进行系统核算与套改 (表 1-3-3), 而新勘探矿床则按照新的标准提交矿产储量。

表 1-3-3 矿产资源套改表

储量种类	地质研究程度		储量级别	勘查阶段		
	套改编码	归类编码				
正在开采、基建矿区的单一、主要矿产及其已（能）综合回收利用的共生、伴生矿产储量以及因国家宏观经济政策调控而停采的矿产储量	A + B	勘探	(111)	111		
			(111b)	111b		
	C	勘探	(112)	111		
			(112b)	111b		
		详查	(112)	122		
			(112b)	122b		
	D	勘探、详查 普查	(113)	122		
			(113b)	122b		
计划近期利用、推荐近期利用、可供边探边采矿区单一、主要矿产储量及其可综合回收利用的共生、伴生矿产储量及 1993 年 10 月 1 日以后提交的勘探报告中属能利用（表内）a 亚类矿产储量	A + B		121	121		
			121b	121b		
	C		122	122		
			122b	122b		
	D		(123)	122		
			(123b)	122b		
	因经济效益差、矿产品无销路、污染环境等而停建、停采，将来技术、经济及污染等条件改善可能再建再采的矿区单一、主要矿产储量及其已（能）综合回收的共生、伴生矿产储量		A + B	勘探	2M11	2M11
			C	详查	(2M12)	2M22
D		普查	(2M13)	2M22		
因交通或供水或供电等矿山建设的外部经济条件差，确定为近期难以利用、近期不宜进一步工作，但改善经济条件后即能利用的矿区的单一、主要矿产储量及其可以综合回收的共生、伴生矿产储量	A + B	勘探	2M21	2M21		
	C	详查	2M22	2M22		
	D	普查	2M23	2M22		
由于有用组分含量低有害组分含量高，矿层（煤层）薄，矿体埋藏深、矿床水文地质条件复杂等原因而停建、停采的矿区的单一、主要矿产储量及其已（能）综合回收的共生、伴生矿产储量及闭坑矿区储量	A + B	勘探	2S11	2S11		
	C	详查	2S12	2S22		
	D	普查	2S13	2S23		

一般矿产储量规模与矿产的商业价值有关（全国储量委员会，1987），贵金属矿产储量计量单位小，贱金属矿产储量计量单位大（表 1-3-4）。

表 1-3-4 一般金属矿产的储量规模（储量表）

矿种	储量单位	大型	中型	小型	工业品位指标
铁	矿石（贫矿）/亿吨	>1	0.1~1	<0.1	TFe 25%
	矿石（富矿）/亿吨	>0.5	0.05~0.5	<0.05	
锰矿	矿石/万吨	>2000	200~2000	<200	15%
铬铁矿	矿石/万吨	>500	100~500	<100	Cr ₂ O ₃ 10%
钒	V ₂ O ₅ /万吨	>100	10~100	<10	V ₂ O ₅ 0.7%

续表

矿种	储量单位	大型	中型	小型	工业品位指标
铜	金属/万吨	>50	10~50	<10	0.4%
铅	金属/万吨	>50	10~50	<10	0.7%
锌	金属/万吨	>50	10~50	<10	1.0%
镍	金属/万吨	>10	2~10	<2	0.3%
钨	金属/万吨	>5	1~5	<1	0.15%
锡	金属/万吨	>4	0.5~4	<0.5	0.20%
钼	金属/万吨	>10	1~10	<1	0.06%
汞	金属/吨	>2000	500~2000	<500	0.08%
铋	金属/万吨	>10	1~10	<1	1.50%
金	金属/吨	>20	5~20	<5	3g/t
银	金属/吨	>1000	200~1000	<200	100g/t

第四节 岩石矿床地球化学的发展历史与方向

一、岩石矿床地球化学的发展历史

岩石矿床地球化学的发展是基于一些重要的实践发现的基础上,进行系统地球化学理论研究,主要包括以下几个方面。

1. 超深钻成果

苏联在科拉半岛及其他地区古老变质岩区钻探的超深钻(图1-4-1)发现,在太古代变质活动期:

(1) 科拉半岛古变质岩地温梯度是现在的5~7倍,即达到150~210℃/km。这样高的梯度对成矿是十分重要的。

(2) 在乌兹别克穆龙套金矿区的深钻发现,硫化铁矿物在浅部黄铁矿为主要载金矿物,深部变为磁黄铁矿且不含金。这表明黄铁矿脱硫转变为磁黄铁矿的过程也是排金的过程,这样金在向上运移过程中遇到黄铁矿被吸附,进一步富集, $\text{FeS}_2 \rightarrow \text{FeS}$ 。

(3) 超深钻的岩石地球化学资料结果与V. M. 戈尔德施密特(1929)、F. W. 克拉克(1924)的估算结果非常一致。大陆地壳上层主要是太古界花岗片麻岩,过渡层主要是斜长紫苏花岗岩,年龄是30亿~35亿年。

(4) 在近年的海洋钻探中发现了类似于塞浦路斯和日本第三纪蛇绿岩的海底蛇绿岩,这对研究蛇绿岩演化与成岩成矿地球化学研究具有十分重要作用。

2. 热水活动研究

海洋潜水技术的发展使人们有机会直接潜入海底观察海底热水活动,研究现代成矿作用(侯曾谦,2003)。目前已经在红海、太平洋中脊、大西洋中脊、印度洋和一些海槽看

到矿化物、硅质岩的形成过程。这种观察，结合水-岩实验、同位素研究，逐渐形成完善了海水循环成矿理论。

海底海水在大洋中脊处由于岩浆加热造成深部循环，并活化或溶解了其中的金属元素或其他元素，形成含矿溶液。当含矿溶液在洋中脊处喷出时，由于温度、压力及 pH 值物理化学条件的突然变化，其中溶质不稳定而结晶沉淀成矿。

由于海底热水温度很高，具有很强的交代能力，以此可以形成各种产状的矿床，其中包括水岩界面沉积的层状矿床、界面下的望脉状、浸染状矿化。这可以很好解释块状硫化物矿床及硅铁建造的成因，其成因机理已经被水岩实验及氢氧同位素研究所证实。

随着地热能的开发利用，大陆地热区热水活动规律及一些矿化现象被揭示出来，在太平洋周围的活动构造带发现了一系列活动地热系统，正在发生成矿作用。在美国的索尔顿湖和墨西哥的墨西卡利地热区钻井水温在 350℃ 以上，已经达到绿片岩相的变质温度。一些热水凝聚物中发现了达到工业品级的重金属，如硫、汞、砷、锑、铅锌、铜、金、银等，而在东南亚岛弧国家，现代热泉型金矿已经成为重要的工业类型金矿。

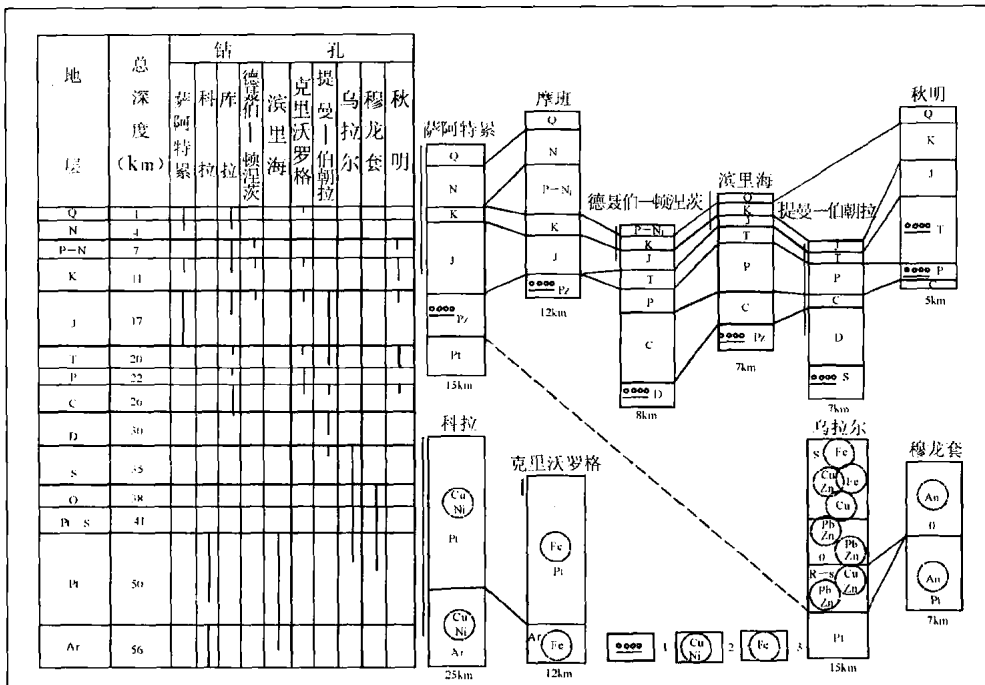


图 1-4-1 苏联超深钻地层剖面图

1. 推测的油气层; 2. 查明的金属矿层; 3. 推测的金属矿层

3. 成矿理论研究的指导作用

找矿勘查是一项综合性工作，例如澳大利亚奥林匹克坝铜-金-铀超大型矿床的发现过程是综合工作的实例，其赋存于元古界地层中，上部被巨厚的古生界覆盖，综合磁力、重力方法探测起到关键作用，同时成矿理论起到向导作用。20 世纪 70 年代，西澳矿业公司对澳大利亚元古界及古生界作了详尽文献研究，目的是寻找沉积岩区内铜矿的可能产地。其理论依据就是，玄武岩遭受风化剥蚀时可以释放大量铜元素，经搬运可以在附近盆